

## 1 Einleitung

Operative Maßnahmen am menschlichen Gefäßsystem sind bereits aus der römischen und griechischen Medizin überliefert, beschränkten sich nach traumatischen Ereignissen jedoch zunächst auf oft unweigerlich zu Verstümmelungen führende Methoden, wie Ligatur und Thermokoagulation mit dem Brenneisen, um lebensbedrohende Blutungen zu stillen. Die erste Erwähnung eines erhaltenden, gefäßchirurgischen Eingriffs findet sich in einer von dem englischen Chirurgen *Hallowell* publizierten Kasuistik von 1759, die über die erfolgreiche Rekonstruktion einer iatrogenen Läsion der A. brachialis berichtet (1). Dies blieb für die nächsten einhundert Jahre jedoch ein Einzelfall. 1897 gelang der erste tatsächlich rekonstruktive Eingriff, eine Femoralisteilresektion und -anastomose, durch den Amerikaner *Murphy* (2). Weitere Meilensteine der gefäßchirurgischen Entwicklung waren später u. a. die systematischen experimentellen Untersuchungen von *Carrell* (3, 4) und *Guthrie* (5), die nicht zuletzt 1912 auch mit einem Nobelpreis gewürdigt wurden, und die erstmalige Nutzung der V. saphena magna als autologen Bypass durch den Franzosen *Kunlin* 1949 (6).

Heute steht die Arteriosklerose mit ihren verschiedenen Erscheinungsformen in den westlichen Industrienationen als Todesursache anerkanntermaßen an erster Stelle. In verschiedenen Studien wird die Inzidenz der peripheren arteriellen Verschlusskrankheit (pAVK oder AVK) mit 4,5 % und die Prävalenz mit 1-6 % angegeben. Weiterhin besteht ein ausgeprägter Zusammenhang zwischen dem Ausmaß der pAVK und der intraindividuellen Mortalität für die in der Mehrzahl der Fälle zusätzlich vorliegende koronare und/oder zerebrale Gefäßerkrankung (7).

Die Einteilung der pAVK erfolgt klinisch unter Einbeziehung der schmerzfreien Gehstrecke auch heute noch in die von *Fontaine* 1954 (8) vorgestellten und von *Marshall* 1983 (9) modifizierten Stadien:

Stadium I	⇒	subklinisches Stadium, Zufallsbefund
Stadium IIa	⇒	schmerzfreie Gehstrecke über 200 m
Stadium IIIb	⇒	schmerzfreie Gehstrecke unter 200 m
Stadium III	⇒	Beschwerden in Ruhe
Stadium IV	⇒	Nekrosen

Weiterhin unterscheidet man je nach Lokalisation des Gefäßverschlusses oder der Gefäßstenose auch zwischen dem Beckentyp, dem Oberschenkeltyp und dem Unterschenkeltyp, die auch kombiniert auftreten können.

### 1.1 Therapeutische Optionen

In den leichteren Stadien kann unter Berücksichtigung der individuellen Situation und des Erkrankungsmusters des Patienten oft zunächst ein konservatives Therapieregime verfolgt werden. Den ersten Schritt in der Behandlung stellt die Reduzierung der Risikofaktoren dar. Dazu gehört der Verzicht auf Nikotin und die medikamentöse Einstellung von arteriellem Hypertonus, Diabetes mellitus und Hyperlipidämie. Weitere Maßnahmen sind auch das Gefäßtraining nach *Ratschow* (10) und gegebenenfalls eine medikamentöse Behandlung. In klinischen Studien konnte für Pentoxifyllin, Naftidrofuryl, Buflomedil und Prostaglandin E1 gezeigt werden, daß sie zu einer überschaubaren, aber doch statistisch signifikanten Verbesserung der schmerzfreien Gehstrecke führen können (11, 12,13). Ein positiver Effekt im Sinne der peripheren Vasodilatation wurde auch für Verapamil beschrieben (14). Nach Auffassung der Deutschen Gesellschaft für Angiologie (DGA) hat die Verwendung vasoaktiver Substanzen nur Sinn, wenn sie gezielt und kritisch erfolgt. Nach den Richtlinien der DGA ist sie im Stadium II sinnvoll, wenn andere Therapieprinzipien zur Behandlung nicht in Frage kommen und wenn u. a. ein Gehtraining nicht durchgeführt werden kann oder nicht ausreichend ist, der systolische Arteriendruck an der A. dorsalis pedis und der A. tibialis posterior jeweils über 60mm Hg liegt und die schmerzfreie oder absolute Gehstrecke so eingeschränkt ist, daß die Lebensqualität der Patienten erheblich reduziert ist (11).

Ab Stadium IIb, im Einzelfall eventuell aber auch schon in einem früheren Erkrankungsstadium, kommen verschiedene interventionelle Verfahren zum Einsatz.

Handelt es sich um kurzstreckige Gefäßstenosen oder -verschlüsse, wird im Sinne eines minimalinvasiven Vorgehens zunächst die perkutane transluminale Angioplastie (PTA) als rekanalisierender Eingriff in Erwägung gezogen werden. Um den Behandlungserfolg längerfristig zu gewährleisten, kann dies vor allem im Bereich der Beckenarterien gegebenenfalls mit der Implantation eines Stent kombiniert werden. Sind die minimal-invasiven Operationsverfahren erschöpft, so stehen weitergehende Maßnahmen zur Verfügung. Gelegentlich ist die Rekanalisierung einer obliterierten

Arterie noch durch eine Thrombendarteriektomie (TEA) möglich (15, 16). Häufig ist schließlich die Anlage eines Bypasses zur Umgehung der Obliteration unumgänglich.

Für die Prognose der operativen Verfahren sind in Anlehnung an die *Virchow'sche Trias* (verändertes Stromzeitvolumen durch Wirbelbildung, Stase und Hyperkoagulabilität) (17, 18), unabhängig von der Art des gewählten Eingriffes, der periphere Widerstand und die Abstromverhältnisse (run-off) von maßgeblicher Bedeutung, weshalb verschiedene Arbeitsgruppen seit längerem an der Entwicklung von Prädiktoren und prognostischen Faktoren für die Wahrscheinlichkeit einer längerfristigen Bypassdurchgängigkeit arbeiten (19, 20, 21, 22).

Entscheidend für den anhaltenden Erfolg jedweder Intervention ist die Gewährleistung eines suffizienten Einstromes und eines ausreichenden Abflusses des der poststenotischen Region anschließend vermehrt zugeführten arteriellen Blutes. Ist diese Voraussetzung nicht erfüllt, so muß es aufgrund der weiterhin pathologischen Flußverhältnisse in der Mehrzahl der Fälle zu einem Rezidivverschluß der rekanalisierten Gefäßstrecke oder des Bypasses kommen.

## 1.2 Diagnostische Möglichkeiten

- Dopplersonographie

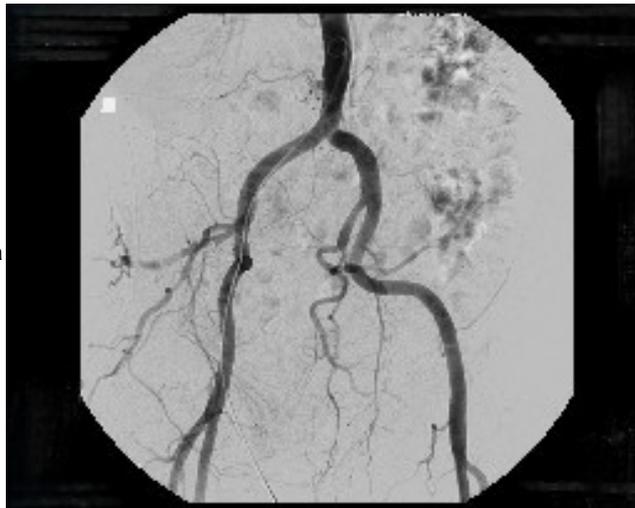
Zusätzliche Informationen über die aktuellen Perfusions- und Stromverhältnisse liefert die dopplersonographische Untersuchung des systolischen Blutdruckes der Knöchelarterien, also der A. tibialis posterior (ATP) und der A. dorsalis pedis (ADP). Eine Aussage über den postoperativ potentiell zu erwartenden Abstrom läßt auch diese Untersuchung nicht zu (23).

- Konventionelle arterielle Angiographie und digitale Subtraktionsangiographie (DSA)

Eine der diagnostischen Säulen für die Wahl des operativen Verfahrens ist die angiographische Darstellung der Becken-Bein-Gefäße mit einem Kontrastmittel. Sie gibt Aufschluß über Lage, Länge und Ausmaß einer Stenose oder eines Verschlusses (17). Poststenotisch kommt es wegen unphysiologischer Fließgeschwindigkeiten und Verwirbelungen des Blutstromes mit Abriß der physiologischen Laminarströmung oft zu einer nur unzulänglichen Anreicherung des Kontrastmittels, so daß die weiter peripher gelegenen Gefäße häufig verdämmern und sich so einer Beurteilung entziehen. Dies gilt besonders für nacheinander geschaltete Stenosen und Verschlüsse in mehreren

Gefäßabschnitten. Durch Einführung der digitalen Subtraktionstechnik in die arterielle Angiographie ist die Bildqualität deutlich besser geworden. Hierbei werden das Negativ der Leeraufnahme und das Positiv der Kontrastmittelaufnahme miteinander addiert, überflüssige Informationen bzw. Strukturen werden eliminiert und als Ergebnis kommen nur die mit Kontrastmittel gefüllten Gefäße zur Darstellung (Abb. 1).

**Abb. 1: DSA der Beckenetae**  
 (Abbildung aus: [www.radiologie.unispital.ch/german/HealthProfessionals/Magnetresonanztomographie/Spezialuntersuchungen/MRAngiographie.htm](http://www.radiologie.unispital.ch/german/HealthProfessionals/Magnetresonanztomographie/Spezialuntersuchungen/MRAngiographie.htm))



Trotzdem führen Stenosen und Verschlüsse im Becken- und im Oberschenkelbereich zu einem extrem verlangsamten Kontrastmittelfluß in den Unterschenkelgefäßen und deren Kollateralen, so daß die Kontrastmittelanreicherungen häufig nicht ausreichen, um den Abstrom und die distale Anastomosenregion hinreichend beurteilen zu können. Die Indikation zur Anlage eines femoro-poplitealen oder femoro-cruralen Bypasses hängt aber obligat von der angiographischen Darstellung anastomosierbarer Unterschenkelgefäße ab (24).

- Farbkodierte Duplexsonographie (FKDS)

Die seit 1987 zur Verfügung stehende farbkodierte Duplexsonographie stellt eine Weiterentwicklung der Duplexsonographie dar, mit der zunächst innerhalb eines Grauwertbildes neben der Gewebedarstellung (B-Bild) die Blutbewegung in einem Gefäßareal erfaßt werden konnte. Diese wurde außerhalb des Bildes als Spektrum abgebildet. Der entscheidende Nachteil dieser Methode lag jedoch in der praktischen Unmöglichkeit, die Flußbewegung über das gesamte Schnittbild darzustellen, da hierzu der Meßpunkt über die Bildfläche gefahren werden müßte. Der erforderliche enorme zeitliche Aufwand und die Verschiebungen der Meßebeene, bedingt durch unwillkürliche Bewegungen des Schallkopfes durch den Untersucher oder des untersuchten Beines durch den Patienten, verhindern dies in der Praxis jedoch häufig (25).

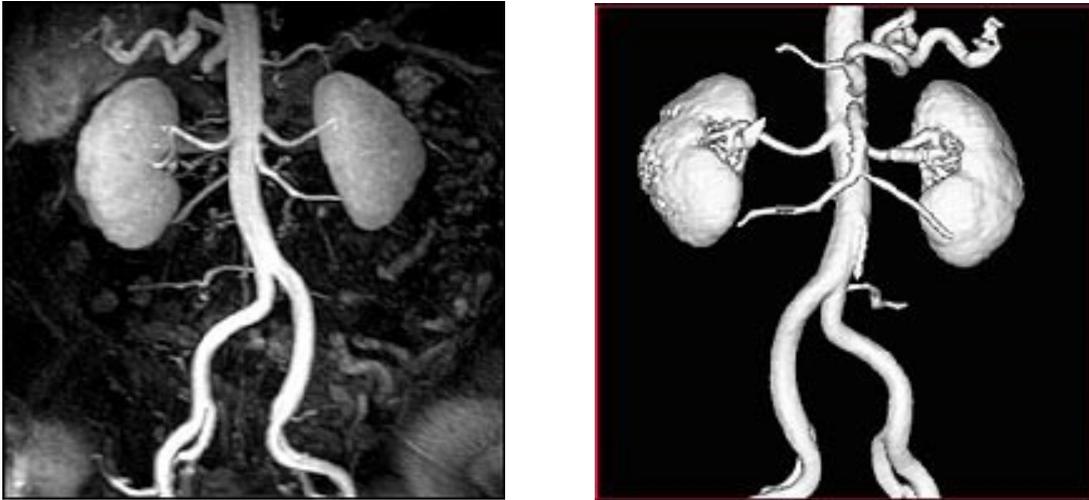
Mit Einführung der FKDS wurde es möglich, neben dem B-Bild gleichzeitig den Blutfluß über die gesamte Bildfläche in Echtzeit zu erfassen (26, 27). Dazu werden die Stellen, an denen eine Bewegung detektiert wird, im Bild farbig kodiert während Orte, die keinen Blutfluß aufweisen, in Grauwerten dargestellt werden (28). Es stehen zwei Farben zur Verfügung, je nachdem, ob die Bewegung vom Schallkopf weg oder zum Schallkopf hin erfolgt. Zusätzlich ermöglicht die Helligkeit der Farben eine Aussage über die Höhe der Frequenzverschiebung und damit der Fließgeschwindigkeit des Blutes. Ein Spektrum kann an ausgewählten Punkten abgeleitet werden. Selbst sehr langsame Flußsignale und auch aus tiefer im Gewebe gelegenen Gefäßen, können noch erfaßt werden (29).

In mehreren Studien wurde eine nahezu vollständige Übereinstimmung von FKDS und konventioneller Angiographie bezüglich der Lokalisation und des Schweregrades einer Stenose bzw. eines Verschlusses nachgewiesen (30, 31, 32, 33). Darüber hinaus ermöglicht die Spektralanalyse eine Aussage über die hämodynamische Relevanz einer Läsion (34, 33). Wie bei der Angiographie ergeben sich aber Schwierigkeiten in der Beurteilung bei mehreren hämodynamisch wirksamen Stenosen, sowie bei sehr niedrigen Fließgeschwindigkeiten, wie sie bei ausgeprägter Arteriosklerose oder bei über Kollateralarterien versorgten Gefäßabschnitten auftreten (35). Anwendung findet die FKDS daher im arteriellen Sektor bis jetzt hauptsächlich als Screening-Untersuchung, bei der Eingrenzung akuter pathologischer Veränderungen der Gefäße im Bereich der unteren Extremität (36, 37), bei der Verlaufskontrolle nach PTA oder Bypassoperation (38), zum Nachweis von Aneurysmata (39) und im venösen Schenkel zur schnellen Sicherung bzw. zum Ausschluß einer tiefen Beinvenenthrombose.

- Magnetresonanz (MR)-Angiographie

Weiterhin zunehmend an Bedeutung gewinnt in der Gefäßdiagnostik die MR-Angiographie (40, 41, 42, 43, 44, 45, 46). Sie bedient sich der seit den 80er Jahren zur Verfügung stehenden Kernspintomographie. Durch Anlegen magnetischer Felder und Nutzung der sogenannten Kernspinresonanz von Atomkernen unter Einstrahlung von elektromagnetischen Wellen, können hier ohne ionisierende Strahlen Schichtbilder des menschlichen Körpers erzeugt werden. In Kombination mit der angiographischen Darstellung der peripheren Gefäße mit einem Kontrastmittel können neben der dreidimensionalen Darstellung der Gefäße (3D-MR-Angiographie) (47), für die gute Übereinstimmungen mit den Befunden der DSA beschrieben werden (48), mittlerweile

auch funktionelle Untersuchungen vorgenommen werden, welche die Bestimmung der Flußgeschwindigkeiten erlauben (Phasenkontrast-Angiographie) (Abb. 2).



**Abb. 2: MR-Angiographie (links) und 3D-MR-Angiographie (rechts) der Aorta abdominalis und der Beckenetaße**

Abbildungen aus: [www.radiologie.unispital.ch/german/HealthProfessionals/Magnetresonanztomographie/Spezialuntersuchungen/MRAngiographie.htm](http://www.radiologie.unispital.ch/german/HealthProfessionals/Magnetresonanztomographie/Spezialuntersuchungen/MRAngiographie.htm)

Die MR-Angiographie steht damit in Konkurrenz zu Duplexsonographie und DSA, dem bisherigen Goldstandard. Von einigen Autoren wird, zumindest für bestimmte Fragestellungen bereits der mögliche Ersatz der DSA durch eine Kombination von Duplexsonographie und MR-Angiographie in Aussicht gestellt (49). Vergleichende Untersuchungen anderer Autoren kommen aber auch schon zu dem Schluß, daß die MR-Angiographie der Duplexsonographie, die überdies sehr untersucherabhängig ist (50), bereits überlegen ist (50, 51, 52). Es wird aber auch über einen allgemeinen Trend zur Überbewertung kernspintomographisch dargestellter Stenosen im Vergleich zu den tatsächlichen Stenosegraden berichtet (53, 54). Weiterhin sind, im Gegensatz zu der vollkommen risikofreien und weit verbreiteten Duplexsonographie, die nur eingeschränkte Verfügbarkeit der MR-Angiographie, bei gleichzeitig hohem apparativen und zeitlichen Aufwand und die Undurchführbarkeit bei vielen Patienten (Träger von Herzschrittmachern, Cochlea-implantaten, u. a.) und die Verabreichung von Kontrastmittel als Nachteile zu nennen. In Zeiten äußerst knapper Mittel im Gesundheitswesen verdient der unterschiedliche Ressourcenverbrauch von FKDS, DSA und MR-Angiographie ebenfalls Berücksichtigung (55). Alle diese Verfahren erlauben, wegen der geschilderten Einschränkungen, allenfalls eine Aussage über den aktuellen Status, ohne Rückschlüsse über den postoperativen run-off nach einem gefäßchirurgischen Eingriff zu ermöglichen.

### 1.3 Zielsetzung und Arbeitshypothese

Der erste Schritt bestand darin, einen systolenähnlichen Impuls distal der krankhaften Gefäßprozesse zu induzieren, um so den postoperativ verstärkten Blutfluß präoperativ zu simulieren. Es sollte herausgefunden werden, ob es möglich wäre, präoperativ einen Eindruck der potentiellen Abflußkapazitäten der beiden wichtigsten Arterien des Fußes zu bekommen und so einen Prognosefaktor zu erstellen.

In Anlehnung an Arbeiten verschiedener Arbeitsgruppen (24, 56, 57, 58, 59, 60, 61), die den Zusammenhang zwischen präoperativ pulsatil induzierten peripheren Dopplerdrücken und dem postoperativen Verlauf untersucht hatten, wurde am Klinikum Benjamin Franklin eine neue kostengünstige Möglichkeit zur präoperativen, nicht-invasiven Beurteilung der distal der Stenose gelegenen Abstromverhältnisse, die Pulsatile Doppler-Druck-Messung (PDDM), entwickelt.

In Zusammenarbeit mit der technischen Forschungswerkstatt des Universitätsklinikums Benjamin Franklin in Berlin (UKBF) wurde eigens dafür ein pneumatisches Pumpsystem - im nachfolgenden Pulsgenerator (PGR) genannt - konstruiert, das mittels eines systolenartigen Impulses eine nach distal gerichtete, hydrostatische Welle im arteriellen Stromgebiet der zu untersuchenden Extremität erzeugen kann.

Ziel der im folgenden beschriebenen Untersuchung war zum einen die bessere Beurteilung der distalen Gefäßabschnitte im betroffenen Unterschenkel zur Abklärung der Anastomosierbarkeit. Zum anderen sollte versucht werden, einen im Vergleich mit den prä- und postoperativ gemessenen Verschußdrücken und den angiographischen Befunden aussagekräftigen Untersuchungsscore zu entwickeln, der als repräsentativ für den peripheren Widerstand und die Kapazität des peripheren Abstromes (run-off) gelten konnte. Ferner wurde analysiert, ob sich mit den ermittelten Werten eine Prognose hinsichtlich der postoperativ bzw. postinterventionell zu erzielenden Verschuß-Doppler-Drücke machen ließe. Die PDDM erfolgte präoperativ zusätzlich zu den obligaten Routineuntersuchungen, wie Verschuß-Doppler-Druck-Messung, Bestimmung der standardisierten Gehstrecke und konventioneller Angiographie bzw. digitaler Subtraktionsangiographie.

Die vorliegende Arbeit sollte somit folgende Fragestellungen beantworten:

1. Läßt sich distal einer Gefäßstenose nicht-invasiv ein systolenähnlicher Impuls und ein daraus resultierender, von außen meßbarer Effekt induzieren?

2. Welche Parameter können zur quantitativen und qualitativen Beschreibung dieses Effektes herangezogen werden?
3. Beeinträchtigt der Erkrankungstyp die Verwertbarkeit der abgeleiteten Meßwerte?
4. Beeinträchtigt das Erkrankungsstadium die Verwertbarkeit der abgeleiteten Meßwerte?
5. Läßt sich daraus ein präoperativer Prognosefaktor über die potentiellen Abflußkapazitäten der beiden wichtigsten Fußarterien ableiten?
6. Kann präoperativ eine valide Prognose der postoperativ zu erwartenden Verschluß-Doppler-Drücke gegeben werden?